

## О ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАХВАТА ЧАСТИЦ В БЕТАТРОНЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ФОКУСИРУЮЩИХ СВЧ ПОЛЕЙ

Ю. А. НЕПОКРЫТЫХ, В. И. ЗЕЛЕНЦОВ

(Представлена научным семинаром сектора сверхвысоких частот и теории  
ускорителей НИИ ЯФЭА)

В связи с использованием бетатронов в различных областях науки и техники уделяется большое внимание улучшению параметров и рентабельности этих ускорителей, в частности, увеличению захваченного заряда. Имеется целый ряд теорий, объясняющих механизм захвата электронов в ускорение [1—6]. Выяснено, что основные потери электронов происходят в момент инжекции и сравнительно небольшой отрезок времени, следующий за ним. Интенсивность можно увеличить за счет:

- 1) увеличения энергии инжекции;
- 2) увеличения сечения рабочей части вакуумной камеры;
- 3) применения бесколебательного механизма захвата электронов в ускорение.

Наряду с этим опубликован ряд работ по созданию установок с дополнительными фокусирующими полями [7, 8, 9], которые позволяют увеличить объем фазового пространства циркулирующего пучка. По-видимому, это должно приводить к увеличению захваченного заряда. В [10] впервые рассмотрена возможность получения дополнительной фокусировки частиц за счет действия СВЧ полей, возбуждаемых в камере ускорителя, что должно приводить к уменьшению потерь инжектируемых электронов.

Дополнительная фокусировка пучка является сильной при выполнении неравенства  $h \gg H_z(t)$ , где  $h$  — напряженность поля волны;  $H_z(t)$  — напряженность управляющего поля.

В связи с тем, что  $\dot{H}^0(t)$  есть функция времени, по мере роста управляющего поля дополнительная фокусировка уменьшается, а фокусировка управляющим полем увеличивается, т. е. СВЧ поля целесообразно использовать, когда мало  $H_z(t)$  и происходит интенсивное высыпание частиц в момент инжекции.

В [10] показано, что для выполнения условия устойчивости движения необходимо, чтобы выполнялось неравенство  $(\kappa R)^2 \gg 1$  (пояснения см. ниже).

Авторами [10] было предложено экспериментально изучить влияние СВЧ полей на процесс захвата электронов в бетатроне.

Согласно [5], магнитное поле бетатрона в процессе инжекции меняется незначительно и не влияет на процесс захвата. Исходя из этого, был изготовлен электромагнит из обычной стали Ст-3 (рис. 1), с диаметром полюсов, профилированных аналогично бетатронным, равным



400 мм, с коэффициентом спада магнитного поля на радиусе равновесной орбиты  $n = 0,65$ . Магнитное поле в межполюсном пространстве, где размещена камера, создавалось катушкой, запитанной постоянным током и размещенной на центральном сердечнике. При напряженности 45 эрстед ( $IW \approx 900$  аэ) свободная циркуляция пучка электронов с энергией инжекции 35 Кэв обеспечивается на радиусе равновесной орбиты  $R = 11,5$  см.

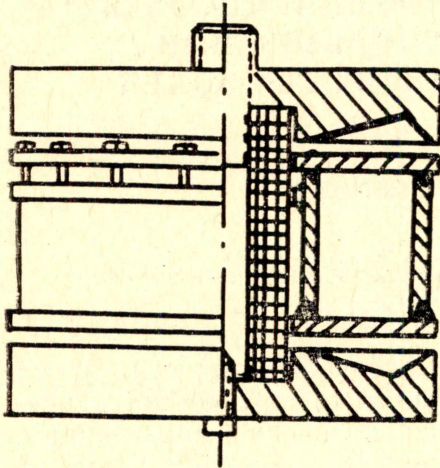


Рис. 1. Камера

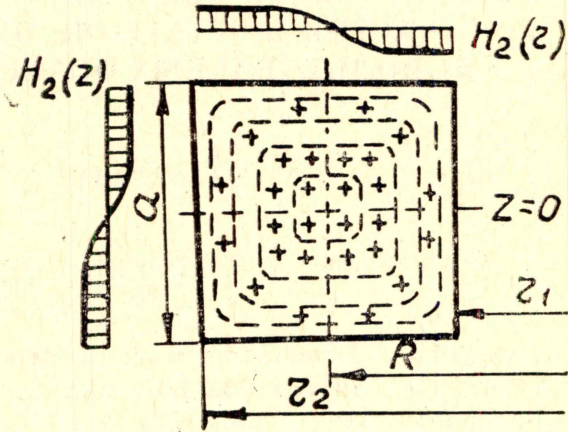


Рис. 2. Эпюры волны

В качестве фокусирующей была выбрана волна типа  $H_{110}$  (рис. 2), так как расчет условий, при которых осуществляется фокусировка, значительно упрощается в связи с тем, что отсутствуют варианты по  $\phi$  [11]. Кроме этого, поверхностные токи имеют только продольную составляющую, что облегчило конструирование камеры и позволило получить высокую добротность. И, наконец, эта волна легко возбуждается при изгибе волновода в плоскости  $E$ , когда изогнутая ось лежит в одной плоскости с вектором электрического поля  $E$  возбуждающей волны типа  $H_{10}$  [12, 13].

Компоненты поля электромагнитной волны

$$E_{\varphi} = j D' k z \sin \frac{\pi}{a} z \Phi'_0(xr) l^{j\omega t};$$

$$H_z = D' x^2 \sin \frac{\pi}{a} z \Phi_0(xr) l^{j\omega t};$$

$$H_r = D' x \frac{\pi}{a} \cos \frac{\pi}{a} z \Phi'_0(xr) l^{j\omega t};$$

$$E_z = E_r = H_{\varphi} = 0;$$

$$\Phi(xr) = I_0(xr) + P' N_0(xr); \quad P' = - \frac{I'_0(xr_{1,2})}{N'_0(xr_{1,2})} = - \frac{I_1(xr_{1,2})}{N'(xr_{1,2})}.$$

Волна данного типа имеет по одному варианту  $H$  составляющей по осям  $r$  и  $z$ .  $H_{\varphi} = 0$ , т. е. магнитные силовые линии представляют собой кривые, которые замкнуты вокруг равновесной орбиты и плоскости, в которых они лежат, перпендикулярны направлению движения частиц. Такая конфигурация поля наиболее удобна, так как обеспечивает радиальную и вертикальную фокусировку.

Из  $E$  составляющих имеется только продольная, которая не имеет вариантов по  $\phi$ , т. е. силовые линии представляют замкнутые окружно-



сти. В процессе движения электрон испытывает влияние  $E_z$ , т. е. попеременно ускоряется и замедляется, как бы колеблется относительно равномерно движущейся точки.

Фазовая скорость распространения волны  $v_\phi = \infty$  и поэтому никакого синхронизма в движении частиц и поля не может быть.

Методика расчета камеры, которая является резонатором, подробно изложена в [12]. Камера представляет собой прямоугольный равномерно изогнутый волновод, внутри которого возбуждается электромагнитное поле (рис. 1).

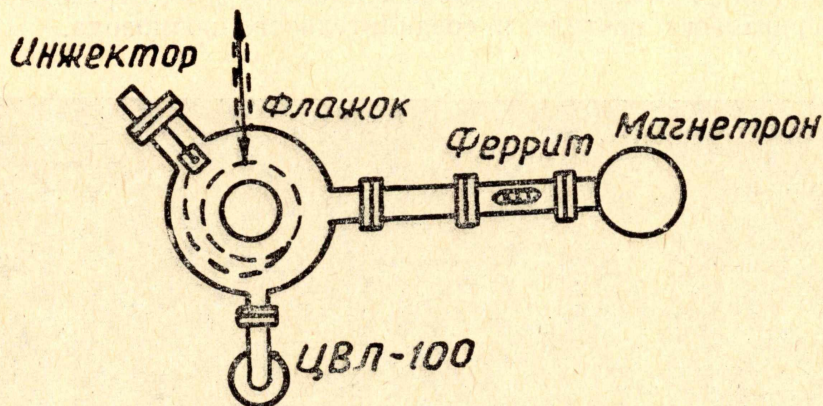


Рис. 3. Сборка установки

Дисперсионное уравнение  $I'_0(xr_1)N'_0(xr_2) - I'_0(xr_2)N'_0(xr_1) = 0$  преобразуется в  $I_1(xr_2)N_1(xr_2) - I_1(xr_2)N_1(xr_1) = 0$ , где  $I_1$  и  $N_1$  — функции Бесселя и Неймана первого порядка.

$$x = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} \text{ корень уравнения,}$$

где  $\lambda$  — длина волны, на которой возбуждается резонатор,  
 $a$  — высота камеры.

Если  $x = xr_1$  и  $\kappa x = xr_2$ , где  $\kappa = \frac{r_2}{r_1}$ , уравнение принимает вид:

$$I_1(x)N_1\left(\frac{r_2}{r_1}x\right) = I_1\left(\frac{r_2}{r_1}x\right)N_1(x) \text{ и решается численно.}$$

Расчет и изготовление были произведены сравнительно легко в связи с изложенным выше и с использованием генератора СВЧ с широким диапазоном плавной перестройки частоты.

В качестве боковых стенок камеры были использованы два коаксиальных медных цилиндра, высотой  $a = 83$  мм и радиусами  $r_1 = 80$  мм,  $r_2 = 150$  мм. Нижняя крышка была вакуумно припаяна к ним припоем ПСР-45. Сверху камера закрывалась крышкой 20 мм толщины и притягивалась 33 болтами М6. В качестве уплотнений использовались резиновые кольца, которые располагались в пазах, проточенных на торцах цилиндров.

В наружной боковой стенке прорезано три отверстия (рис. 3): 1) окно для ввода инжектора, представляющего собой обычную бетатронную пушку, 2) окно для откачки камеры насосом ЦВЛ-100, 3) резонансная щель для возбуждения камеры и представляющая собой диафрагму с размерами  $6,8 \times 1,5$  см<sup>2</sup>. При толщине боковой стенки 0,5 мм и питании камеры через стандартный волновод  $44 \times 72$  мм<sup>2</sup> КСВ = 1,6. Измерения распределения поля показали, что существен-



ных искажений за счет отверстий нет, добротность при резонансе  $Q = 2 \cdot 10^3$  и шунтовое сопротивление  $R_{ш} = 1,3 \text{ мом.}$  [15], резонансная частота равнялась 2732 мГц. В дне камеры были пропущены проводники, служащие для индикации пучка. Уплотнения — тефлон и эпоксидная смола.

Для возбуждения поля в камере был изготовлен генератор с плавной перестройкой частоты, работающей в десятисантиметровом диапазоне. Длительность генерируемого импульса 3 мксек. Высокочастотный тракт вакуумирован и откачка производилась через окно связи и камеру. Он собран из следующих элементов: магнетрона, переходного волновода, ферритового вентиля и соединительного волновода.

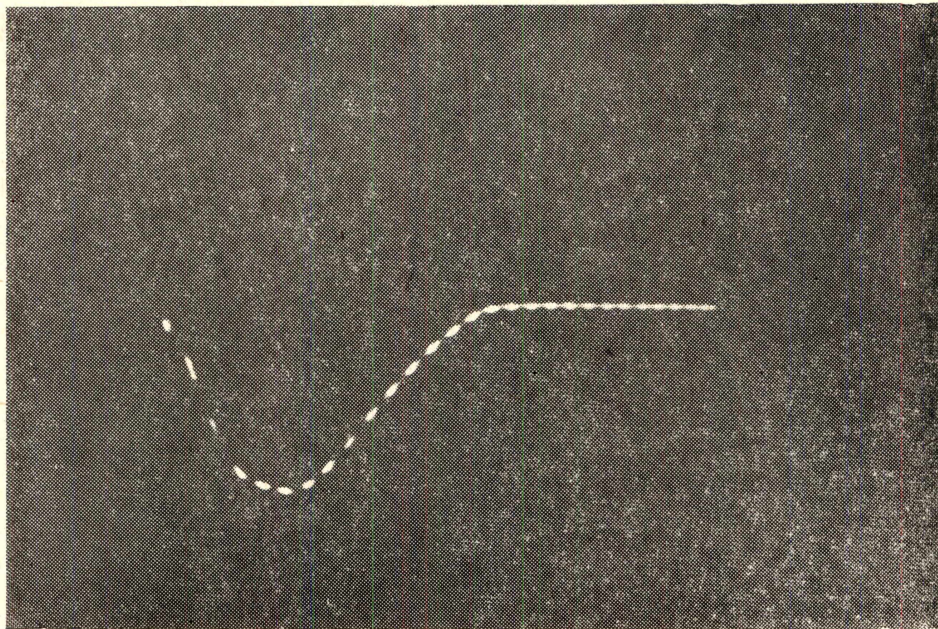


Рис. 4. Импульс инжекции

В [14] приведен теоретический расчет фокусирующих полей и изменения числа бетатронных колебаний частиц за оборот при различных амплитудах полей СВЧ для параметров, близких к описанной выше установке. Так, при  $n = 0,5$  и  $Q = 3 \cdot 10^3$  требуется мощность генератора  $P = 10^5 \text{ вт}$  для того, чтобы увеличить число бетатронных колебаний на оборот с  $\nu = 0,7$ , до  $\nu = 2$ . А так как фазовый объект бетатронных колебаний пучка  $V, \sim \nu^2$ , он увеличивается в 8 раз. Это должно привести к резкому увеличению захваченного заряда.

Методика проведения эксперимента была аналогична описанной в [16]. Обмотка смещения, представляющая два витка, помещена внутри камеры. По ней пропускается ток 80 а длительностью 2 мксек. Установка обмотки вне камеры невозможна (стенки камеры экранируют смещающее поле).

В качестве мишени использовалась пластина из меди  $40 \times 10 \times 1$ , вдвинутая на 3 мм ближе к равновесной орбите, чем торец инжектора. Импульс инжекции показан на рис. 4. Рабочей областью является вершина, длительностью порядка 1,5 мксек и амплитудой 20 ма. При этом в процессе спирализации могло быть захвачено около  $10^{10}$  электронов. На следующем рисунке показано высыпание пучка на мишень в процессе свободной циркуляции; пунктиром показана экстраполиро-



ванная кривая по максимуму тока, сброшенного на мишень в интервале времени до 15 мксек. На рис. 6 показано высыпание электронов при работе магнетронного генератора в момент инжекции. Пунктиром показана экстраполированная кривая сброшенного тока. Сравнение хода кривых (рис. 5, 6) показано на рис. 7. Таким образом видно, что в период работы магнетронного генератора резко сокращается высыпание частиц, а в момент выключения появляется пик. Это можно объяснить следующим:

1. Дополнительное фокусирующее поле удерживает частицы с большим разбросом параметров, нежели может удержать управляющее поле, и по окончании работы генератора они высыпаются.

2. Так как импульс инжекции несколько длиннее импульса ВЧ, то по окончании последнего циркуляция пучка нарушается электронами,

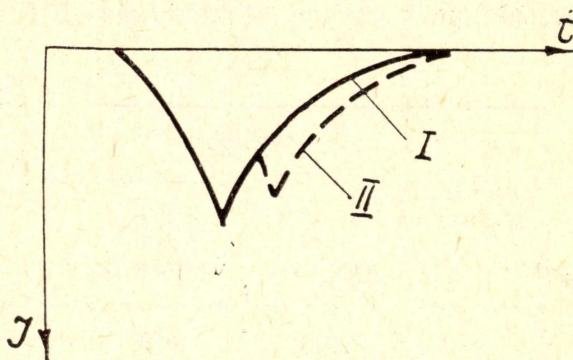


Рис. 5. Циркуляция пучка без ВЧ поля

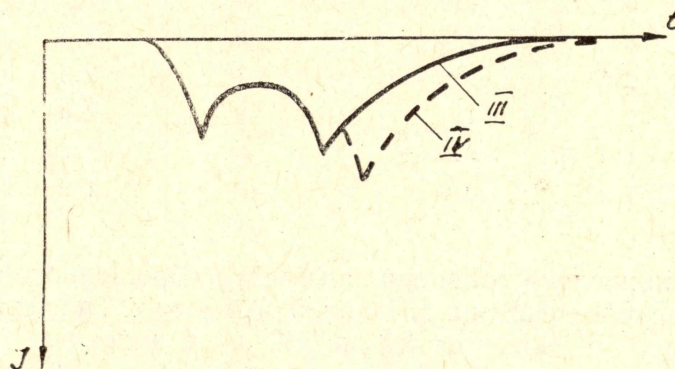


Рис. 6. Циркуляция пучка при воздействии ВЧ поля

инжектируемыми в этот момент. Согласно [1], вдоль равновесной орбиты концентрично образуются орбиты пучков с большими и меньшими энергиями, чем энергия электронов на равновесном радиусе. Эти пучки взаимодействуют между собой таким образом, что на равновесном радиусе и вблизи него создаются благоприятные условия для существования пучка и электроны, поступающие в камеру после окончания фокусировки, нарушают движение.

Результаты эксперимента согласуются и с [5], в которой рассмотрен статистический характер механизма захвата, где было показано, что в процессе циркуляции пучок охлаждается за счет потери части электронов с большим поперечным импульсом. При действии фокусировки процесс охлаждения должен идти интенсивнее в связи с увели-

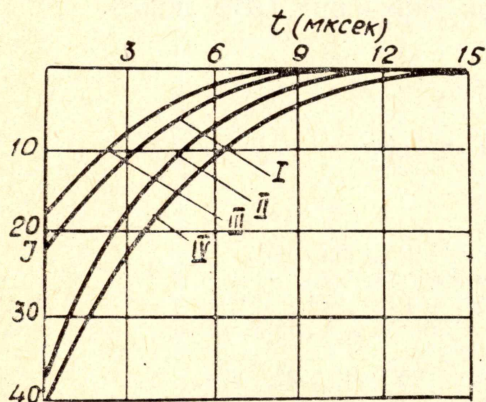


Рис. 7. Сравнение хода кривых рис. 5, 6

сти электронов с большим поперечным импульсом. При действии фокусировки процесс охлаждения должен идти интенсивнее в связи с увели-



чением плотности пучка, и при окончании ее действия часть пучка также теряется.

В табл. 1 дано сравнение между интенсивностью высыпания частиц при спирализации частиц без действия ВЧ поля и с ним в течение времени до 20 мксек после окончания инжекции. Из сравнения видно, что высыпание в случае бездействия ВЧ поля происходило интенсивнее.

Таблица 1

Время мксек	Высыпание пучка на мишень	
	без ВЧ- поля кривая 1	с ВЧ- полем кривая II
0	22,5	20,0
1	18,5	14,0
2	11,5	8,2
3	7,5	5,0
4	5,0	3,2
5	3,8	2,0
6	3	1,5
7	2,5	1,3
8	2	1
9	1,5	0,9
10	1,2	0,8

Таблица 2

Время мксек	Сброшенный ток на мишень	
	без ВЧ- поля	с ВЧ- полем
0	17,5	20,0
1	18,5	21,0
2	13,0	21,0
3	10,0	20,0
4	6,0	17,0
5	4,5	13,0
6	3,5	10,0
7	2,5	8,0
8	2,0	6,0
9	1,25	4,5
10	1,0	3,5

В табл. 2 приведено сравнение амплитуд сброшенного тока на флажок также в случае действия ВЧ полей и без них. Эксперимент проводился при токах инжекции от 30 до 150 ма и энергиях электронов от 20 до 50 Кэв при изменении подаваемой мощности в широком диапазоне. Полученные закономерности полностью согласуются с данными в [1, 5, 14]. При вакууме выше, чем  $2 \cdot 10^{-6}$  мм Hg под действием высокого СВЧ поля в камере возникал разряд.

Данные эксперимента подтвердили теоретический расчет [14] о возможности увеличения коэффициента захвата частиц в бетатроне при использовании дополнительных фокусирующих СВЧ полей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Н. Родимов. Известия ТПИ, 87, 11, 30, 1957.
2. А. Н. Матвеев. ЖЭТФ, 35, 372, 1958.
3. И. М. Самойлов. ЖЭТФ, 37, 705, 1959.
4. А. П. Комар. ЖЭТФ, XXX, 31, 1960.
5. Сейдл. Чехословацкий физический журнал, B11, 390, 1961.
6. П. А. Черданцев. Электронные ускорители, 58, 1961.
7. Б. Н. Родимов. Электронные ускорители, 191, 1964.
8. В. С. Захаров, М. С. Рабинович. ЖТФ, XXXIV, 1984, 1964.
9. М. М. Хапаев. ДАН СССР, 163, 343, 1965.
10. А. Н. Диденко, Г. П. Фоменко. ЖТФ, XXXVI, 1590, 1966.
11. Л. Г. Саливон. Технический отчет, Томск, 1967.
12. Д. И. Воскресенский. Вопросы радиотехники СВЧ, 1957.
13. И. В. Лебедев. Теника СВЧ, 1961.
14. Г. П. Фоменко. Диссертация, Томск, 1966.
15. А. Н. Диденко, В. П. Григорьев. Изв. вузов, Физика, 6, 16, 1964.
16. С. В. Соколов. Электронные ускорители, 5, 1961.